

# DC 마이크로 그리드를 위한 Three-Ports Half Bridge 컨버터의 동작원리 및 독립 전력 제어에 관한 연구

심주영, 최현준, 이준영, 정지훈  
울산과학기술원(UNIST)

## Operational Principles and Decoupled Power Control of Three-Ports Half Bridge Converter for DC Microgrid System

Ju Young Sim, Hyun Jun Choi, Jun Young Lee, and Jee Hoon Jung  
Ulsan National Institute of Science and Technology(UNIST)

### ABSTRACT

DC 마이크로 그리드를 위한 Three Ports Half Bridge (THB) 제안하고 THB 컨버터의 효과적인 제어를 위한 동작 원리 및 수학적 모델링 그리고 각 포트 간의 전력을 독립적으로 제어하는 디커플링(Decoupling) 방법을 제안하고자 한다. DC 마이크로 그리드에서는 수용자의 부하 상황에 따라 계통뿐만 아니라 분산 전원 및 에너지 저장장치(ESS) 등에서도 전력을 공급받을 수 있다. 이로 인해 기존 전력제어 시스템의 경우 2 포트 컨버터 2개가 필요하고, 이는 부피뿐만 아니라 소자의 개수도 증가시키기 때문에 제작 및 설치 단가가 상승한다는 단점이 있다. 3 포트 컨버터의 경우, 하나의 변압기를 이용하고 전력 스위치와 수동소자의 개수를 줄일 수 있으므로 기존의 전력 변환장치 대비 전력 밀도를 높일 수 있다. 하지만 하나의 변압기를 이용하여 3개의 포트가 연결되어 있어 서로 간의 전력간섭이 일어나고, 과도기 때 의도 하지 않은 전력의 흐름이 발생할 수 있게 된다. 본 논문에서는 수학적 모델링과 분석을 통해 3 포트 컨버터의 동작원리를 알아보고, 각 포트 간 전력 제어의 상호 간섭을 제거할 수 있는 디커플링 방법을 제안하고자 한다. 또한, 모의시험과 1 kW급 시작품을 이용하여 제안한 디커플링 전력제어 방법의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

최근 교류배전의 대체 배전방법으로 케이블 손실이 적고 전력변환단계 감소 등과 같은 장점을 가진 직류배전에 대한 관심이 높아짐으로써 DC microgrid가 미래형 전력배전 시스템으로 각광받고 있다. DC microgrid에서는 태양광발전뿐만 아니라 신재생 에너지원들과 에너지저장장치(ESS) 등을 포함하고 있다. 이러한 DC microgrid내의 여러 에너지원들과 부하들의 유동적인 전력흐름을 제어하기 위한 양방향 DC/DC 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. DC microgrid를 위한 양방향 컨버터로는 Full bridge형태의 Active Bridge 컨버터가 널리 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. DC microgrid에서 부하의 상황에 따라 계통뿐만 아니라 분산 전원 및 ESS에서도 전력을 공급 받게 된다. 이는 부하입장에서 2단계의 전력변환을 거치게 되므로 낮은 효율을 야기하게 된다. 하지만 3포트 컨버터를 사용하게 되면 전력흐름의 유동성이 증가될 뿐만 아니라 기존 방식에서 두 번의 전력변환이 발생하는 상황을 한번으로 전력변환단계를 줄일 수 있게 됨으로써, 높은 효율을 기대할 수 있다. 그리고 소.

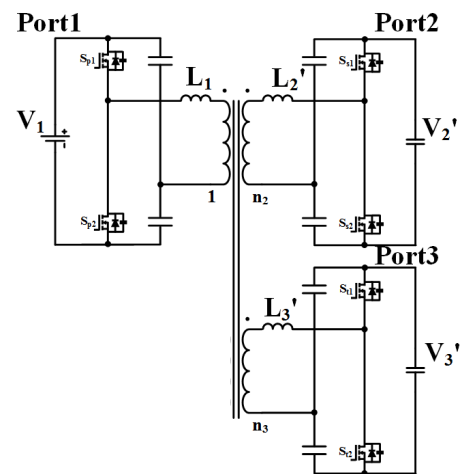


그림 1. Three ports Half Bridge 컨버터

자의 개수를 줄임으로써 전력밀도를 높인다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 Half bridge형태의 3포트 컨버터 (THB) 를 제안하고 동작원리 및 전력 디커플링(Decoupling) 방법을 제안하고자 한다.

### 2. Three-ports Half Bridge 컨버터

#### 2.1 Three-ports Half Bridge 컨버터의 전력흐름 분석

3포트 DAB의 전력흐름을 분석하기 위해서는 각 포트간의 커플링 인덕턴스를 알아야한다. 그림 1과 같은 THB 컨버터를 1차측으로 환산한 등가회로는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 하지만 Y 형태의 등가회로는 포트간의 커플링 인덕턴스를 알아 보기 힘들기에 Y-Δ변환을 이용하여 그림 3과 같이 Δ형태의 등가회로로 변환하여 분석한다.

각 포트간의 전력방정식은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

$$P_{12} = \frac{\Phi_{12}(\pi - \Phi_{12})}{2\pi^2 L_{12} f_{sw}} V_1 V_2 \quad (1)$$

$$P_{13} = \frac{\Phi_{13}(\pi - \Phi_{13})}{2\pi^2 L_{13} f_{sw}} V_1 V_3 \quad (2)$$

$$P_{32} = \frac{(\Phi_{12} - \Phi_{13})(\pi - (\Phi_{12} - \Phi_{13}))}{2\pi^2 L_{32} f_{sw}} V_2 V_3 \quad (3)$$

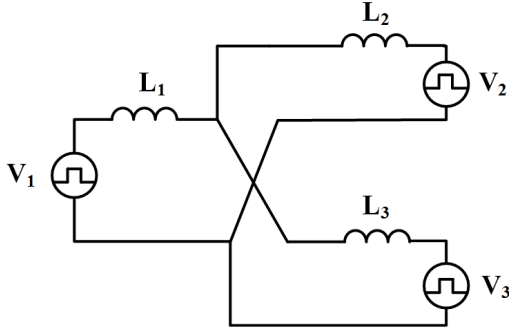


그림 2 Y형태의 Three-ports Half Bridge 컨버터의 등가회로

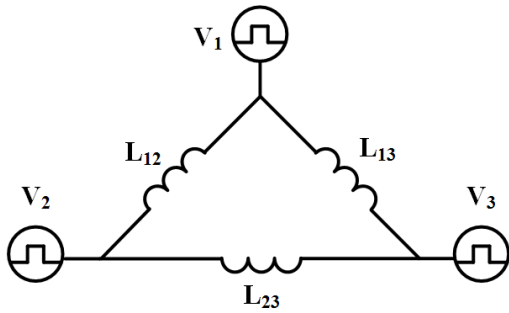


그림 3 Δ형태의 Three-ports Half Bridge 컨버터의 등가회로

$P_{xy}$ 는 포트x에서 포트y로 주는 전력을 의미하고  $\Phi_{12}$ 는 포트1과 포트2의 위상차  $\Phi_{13}$ 는 포트1과 포트3의 위상차를 의미한다.

한 포트에서의 총 전력은  $P_x = P_{xy1} + P_{xy2}$ 로 표현가능하다.

예를 들어 포트1의 전력은  $P_1 = P_{12} + P_{13}$ 이다.

모든 포트의 전력의 합은 0이므로  $P_2$ 와  $P_3$ 의 전력이 결정되면  $P_1$ 의 값은 따라서 결정이 된다.  $P_2$ 와  $P_3$ 는  $\Phi_{12}$ 와  $\Phi_{13}$ 의 함수이므로 두 연립방정식의 해를 구해 위상차  $\Phi_{12}$ 와  $\Phi_{13}$  값으로 원하는 모든 방향으로 전력제어를 할 수 있다.

그림 4는 부하에 따른 포트2와 포트3의 전력을 PSIM에서 시뮬레이션한 파형이다. 시뮬레이션에 사용된 THB는 [2]를 참조하여 설계하였으며, Δ형태의 등가회로에서 각 포트간의 인덕턴스를 1 kW급으로 20%의 마진을 두고 설계하였다. 그림 4의 경우  $t < 0.1$ 에서  $P_2 = 380$  [W],  $P_3 = 0$  [W],  $0.1 \leq t < 0.15$ 에서  $0.1 \leq t < 0.15$   $P_2 = 1000$  [W],  $P_3 = 0$  [W] 그리고  $P_2 = 100$  [W]  $P_3 = 0$  [W]로 부하에 따라 제어되고 있다.

시스템의 정상상태에서는 안정적인 동작을 보여주나  $t = 0.1$ 과  $t = 0.15$ 에서의 과도상태때 0 [W]로 제어되고 있는 포트3과의 간섭이 이루어지고 있음을 확인 할 수 있다. ( $P_3 = 98$  [W] at  $t = 0.1$ ,  $P_3 = 150$  [W] at  $t = 0.15$ )

## 2.2 Three-ports Half Bridge 컨버터의 전력 디커플링 제어

그림 4와 같이 두 전력사이의 커플링 성분이 존재하며 이를 제거 해주기 위해서 THB 컨버터의 수학적 모델링이 필요하다.

포트2의 전압  $V_2$ 와 포트3의 전압  $V_3$ 가 일정 전압으로 제어된다고 가정하면 포트2의 전력  $P_2$ 와 포트3의 전력  $P_3$ 는 각 포트 전류  $I_2$ 와  $I_3$ 에 의해 제어 될 수 있다<sup>[3]</sup>.

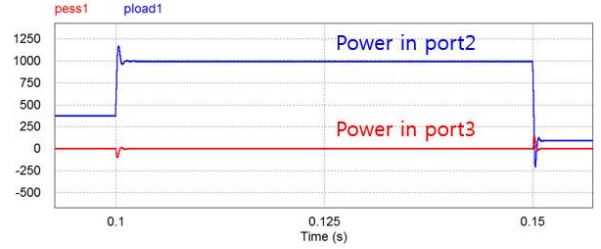


그림 4 포트2와 포트3의 전력 시뮬레이션 결과

( $V'_1 = 380$  [V],  $V'_2 = 380$  [V],  $V'_3 = 60$  [V],  $n = 6 : 6 : 1$   
 $f_{sw} = 50$  [kHz],  $L_1 = 24.56$  [μH]  $L'_2 = 24.56$  [μH],  $L'_3 = 0.648$  [μH])

$$I_2 = \frac{\Phi_{12}(\pi - \Phi_{12})L_3 V_1 + (\Phi_{12} - \Phi_{13})(\pi - (\Phi_{12} - \Phi_{13}))L_1 V_3}{2\pi^2 f_{sw} (L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3)} \quad (4)$$

$$I_3 = \frac{\Phi_{13}(\pi - \Phi_{13})L_2 V_1 + (\Phi_{13} - \Phi_{12})(\pi - (\Phi_{13} - \Phi_{12}))L_1 V_2}{2\pi^2 f_{sw} (L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3)} \quad (5)$$

(4)와 (5)는 위상차  $\Phi_{12}$ 와  $\Phi_{13}$ 에 대하여 선형화가 필요하다.

$$\Phi(\pi - \Phi) \approx \frac{8}{\pi} \sin\Phi \quad (0 \leq \Phi \leq \pi) \quad (6)$$

푸리에 급수로  $\Phi(\pi - \Phi)$ 는 식 (6)과 같이 근사화 할 수 있다.  $I_2$ 와  $I_3$ 를  $P_1 = 1000$  [W],  $P_2 = -1000$  [W],  $P_3 = 0$  [W]가 되는 동작점  $\Phi_{12} = 0.4725$  [rad],  $\Phi_{13} = 0.2362$  [rad]에서 테일러급수를 이용한 선형 근사화를 하면 식 (7)과같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{0.89L_3 V_1 + 0.97L_1 V_3}{(1/4)\pi^3 f_{sw} K} & -\frac{0.97L_1 V_3}{(1/4)\pi^3 f_{sw} K} \\ -\frac{0.97L_1 V_2}{(1/4)\pi^3 f_{sw} K} & \frac{0.97L_2 V_1 + 0.97L_1 V_2}{(1/4)\pi^3 f_{sw} K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{12} \\ \Phi_{23} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K = L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3 \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{12} \\ \Phi_{13} \end{bmatrix} \quad (9)$$

변수  $\Phi_{12}$ 와  $\Phi_{13}$ 로 독립제어를 위해선 식 (9)에서 보이는 커플링 계수인  $G_{12}$ 와  $G_{21}$ 이 제거 되어야 한다.

커플링 계수  $G_{12}$ 와  $G_{21}$ 을 제거하기 위한 디커플링 행렬  $D$ 를 시스템 행렬  $G$ 의 역행렬로 정의한다.

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \begin{bmatrix} G_{22} & -G_{12} \\ -G_{21} & G_{11} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$G_{12}$ 와  $G_{21}$ 의 값은  $G_{11}$ 과  $G_{22}$ 값에 포함 되어있고 모든 변수들은 양의 값이기에 시스템 행렬  $G$ 의 역행렬은 항상 존재한다.

그림 5와 같이 디커플링 행렬  $D$ 를 시스템 행렬  $G$  앞에 곱

해줌으로써 커플링 계수  $G_{12}$ 과  $G_{21}$ 을 제거할 수 있고 변수  $\Phi_{12}^*$ 와  $\Phi_{13}^*$ 로 시스템을 독립제어 할 수 있다. 또 DC load, 예를 들어 포트2의 전압제어기는 전류제어기와와의 간섭을 피하기 위해 전압제어루프의 속도를 전류제어기에 비해 10배 이상으로 설정한다.

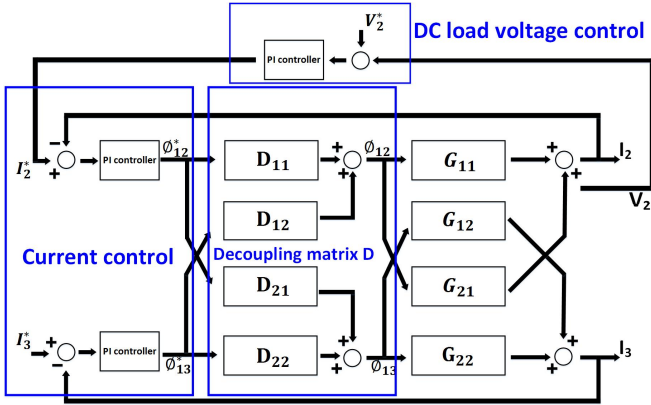


그림 5 Three-ports Half Bridge 컨버터의 제어 블록 다이어그램

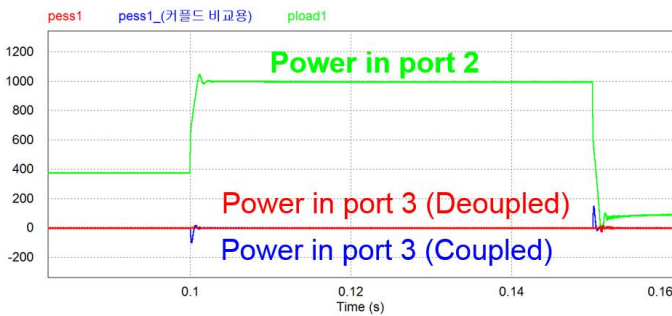


그림 6 포트2와 포트3의 디커플링된 전력 시뮬레이션 결과

그림 6은 부하에 따라 변동하는 포트2의 전력이 일정 전력으로 제어되고있는 포트3의 영향에 대한 결과 시뮬레이션이다. 붉은색 선은 디커플링된 포트3의 전력, 푸른색 선은 커플링된 포트3의 전력이다. 시뮬레이션 결과는 전력이 변하는 과도구간에서 커플링되어있던 각 포트들을 디커플링 행렬을 이용하 독립제어가 가능함을 보여주고 있다. ( $P_3 = 5.9$  [W] at  $t = 0.1$ ,  $P_3 = 22$  [W] at  $t = 0.15$ )

### 3. 결론

본 논문에서는 1kW급 THB 컨버터에 대한 분석을 진행하고 디커플링 알고리즘을 제안하였다. Three ports Half Bridge 컨버터는 각 포트간의 위상차로 원하는 모든 방향으로 양방향 전력제어가 가능하고 전력이 변하는 과도구간에서의 포트간의 커플링 상관관계가 있음을 보였다. 이를 디커플링 행렬을 이용하여 전력이 변하는 과도구간의 커플링 관계를 분석하였다. 최종적으로 1 kW급 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘을 검증하였다.

이 논문은 2018년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업임(2016R1A2B4011934)

### 참고 문헌

- [1] R.W. De Doncker, D.M. Divan, M.H. Kheraluwala "A Three Phase Soft Switched High Power Density dc/dc Converter for High Power Applications" IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol 27, No. 1, pp. 63-73, 1991, Jan/Fe
- [2] H. J. Choi and J. H. Jung, "Practical design of dual active bridge converter as isolated bidirectional power interface for solid state transformer applications," J. Electr. Eng. Tech., Vol.11, No.5, pp.1266-1273, Sep. 2016."
- [3] C. Zhao, S. D. Round, and J. W. Kolar, "An isolated three port bidirectional DC DC converter with decoupled power flow management," IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 5, pp. 2443-2453, Sep. 2008.